

IL CONSOLIDAMENTO STRUTTURALE DELLA CHIESA DI SANTA CATERINA IN LUCCA

Lorenzo Jurina

Dip. ABC, Politecnico di Milano, Milano – www.jurina.it

SOMMARIO

La chiesa di Santa Caterina a Lucca, nata dal progetto dell'architetto Francesco Pini alla metà del XVIII secolo, rappresenta un singolare esempio di edificio a pianta centrale, ispirato al Barocco Romano.

L'intervento è volto al consolidamento statico e al miglioramento sismico comprendendo interventi sulle murature, sui solai, sulle capriate lignee e sulla cupola. Nel consolidamento si è privilegiato l'utilizzo di materiali quali il legno, la muratura e l'acciaio inox per soddisfare le esigenze di compatibilità con la materia storica, con l'intenzione che i nuovi materiali avessero una vita utile pari a quella dei materiali in sito, facilitandone, per altro, la manutenzione programmata.

Conservazione dell'edificio significa anche conservazione dello schema strutturale: in tale ottica sono stati preferiti interventi in affiancamento alle strutture esistenti, volti a favorire il mutuo collegamento tra le parti, nel tentativo di dare luogo ad una "scatola strutturale" dove le parti più deboli potessero appoggiarsi alle più forti.

Particolare cura si è dedicata alla accessibilità dei luoghi, aprendo nuovi percorsi ai visitatori che potranno così fruire dei dettagli costruttivi, quelli antichi e quelli nuovi, che caratterizzano la preziosa cupola e le strutture lignee del sottotetto. Rendere visitabile questo luogo significa invitare gli operatori ad una costante manutenzione che preserverà l'ambiente da ulteriori danneggiamenti.

ABSTRACT

The church of Santa Caterina in Lucca, designed by architect Francesco Pini in the half of XVIII century, represents one of the most interesting example of central-plan building, inspired by the Roman Baroque.

Due to some deteriorated conditions, especially in correspondence of the dome and the roof, several static and seismic interventions were necessary. They included the consolidation of masonry, slabs, timber trusses and dome.

A significant care has been adopted in the choice of the new materials, in order to guarantee the compatibility with the historical ones, durability and the possibility of an easy planned maintenance. For this reason, timber, masonry and stainless steel have been used as structural materials.

There is no unanimous reply about the meaning of "conservation"; in any case, conservation means also keeping the original structural scheme, if possible. Thus, solutions in which the new structures are put beside the existing one have been preferred, with the aim of conferring a mutual connection between the parts, and to obtain the so called "box behavior".

A particular attention was dedicated to the accessibility, even to that spaces that usually can't be visited. Visitors will appreciate some details, both new and original ones, of the dome and the roof.

If we allow visits in this place we contribute to ensure a constant maintenance, avoiding further damages.

PAROLE CHIAVE: muratura, cupole, cerchiature, restauro, consolidamento, miglioramento sismico, fruibilità

1. STORIA E STATO DI FATTO

La chiesa di Santa Caterina si trova lungo uno dei principali percorsi turistici della città Lucca, vicino a Porta Sant'Anna e piazzale Verdi. Si affaccia sull'angolo formato tra la via del Crocifisso e via Vittorio Emanuele II, di fronte all'ex Manifattura Tabacchi, ed è situata all'interno del complesso di edifici che corrispondono all'originario convento delle Monache di Santa Caterina da Siena del terzo Ordine di San Domenico.

All'inizio del XVIII secolo il Monastero di Santa Caterina, sebbene ben definito nel suo spazio urbano, risulta composto da più case disomogenee, è "*piccolo ed angusto, e che neppure ha forma di convento per essere composto di più casette unite assieme colli solari, alcuni più alti, altri più bassi*". Iniziano dunque a partire dal 1663 i lavori di demolizione ed innalzamento del nuovo monastero che prevedono la costruzione di un unico edificio a forma di "L" con quattro piani in elevazione e, nell'angolo sud-ovest dell'isolato della fabbrica, di una nuova chiesa. Quest'ultima viene progettata dall'architetto lucchese Francesco Pini, allievo e collaboratore di Filippo Juvarra, che introduce nella tradizione lucchese e toscana una nuova geometria flessibile, orientata verso il barocco romano, e con influssi, soprattutto per le soluzioni esterne di facciata, dell'opera dello Juvarra. I lavori di costruzione, iniziati già nel 1738, terminano nel 1743 e la chiesa viene consacrata nel 1748.

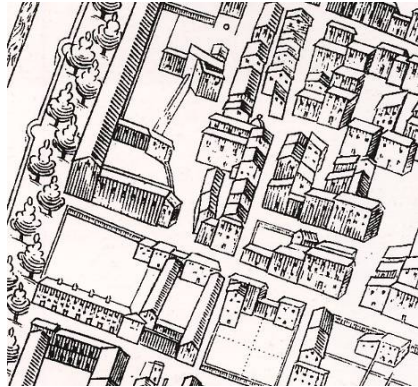


Figura 1. Veduta assonometrica della città, attribuita a George Hoefnagel, 1588



Figura 2. La Chiesa di Santa Caterina a Lucca prima dell'inizio del cantiere

La facciata, che è la sola parte esternamente visibile della chiesa costruita all'interno della struttura conventuale, si innesta sull'angolo con un portale timpanato in pietra arenaria, impostato su colonne di ordine composito. La soluzione progettuale dell'ingresso angolare risolve in maniera dinamica la dialettica con la strada e con la compagine monasteriale.

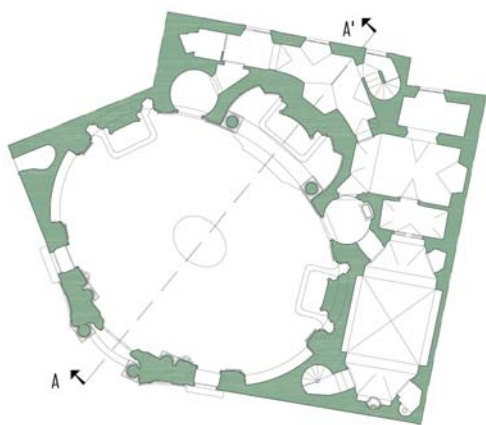


Figura 3. Planimetria della Chiesa di Santa Caterina a Lucca. Piano terreno



Figura 4. Sezione A-A della Chiesa di Santa Caterina a Lucca

Lo spazio interno, su pianta ellittica, è scandito da sottili membrature architettoniche ornate da stucchi che schermano le pareti dipinte con motivi di false architetture, innescando l'artificio tra realtà e illusione. I dipinti parietali e la decorazione illusionistica della cupola sono di Bartolomeo De Santi e del figurista Lorenzo Castellotti, pittori con i quali l'architetto Pini instaura una collaborazione artistica in diversi suoi cantieri.



Figura 5. Gli affreschi di Bartolomeo De Santi Chiesa di Santa Caterina a Lucca prima dell'inizio del cantiere

La cupola mette in scena, attraverso un'elaborata decorazione pittorica, una straordinaria scenografia teatrale: la zona inferiore è decorata con una "quadratura" di finte architetture. L'architettura illusoria, che dilata e apre lo spazio, culmina nella visione oltre l'oculo, aperto alla sommità della cupola, dell'affresco della *Gloria di Santa Caterina*, dipinto su supporto di incanniccio inchiodato ad una struttura di legno solidale alla struttura di copertura. Si tratta di una geniale invenzione di meraviglia barocca, che con i mezzi dell'arte e dell'artificio (l'illuminazione applica a una scena dipinta l'idea borrominiana della "camera di luce") realizza la suggestione di un'apparizione, in un cielo vertiginoso e trascendente.



Figura 6. Affresco della *Gloria di Santa Caterina*, fissato su supporto incanniccio, di Lorenzo Castellotti al termine degli interventi di restauro

Con la soppressione dei monasteri nel 1806, durante il principato napoleonico dei Baiocchi (1805-1814), il Convento viene trasformato in "*Conservatorio, o sia Ospizio (...) di Santa Caterina per gli invalidi diviso in due parti per gli uomini e per le donne*".

Alla metà del XX secolo la porzione dell'ex convento delle suore di S. Caterina, con affaccio su via del Crocifisso, viene demolito e la restante parte dell'ex convento su Via Vittorio Emanuele II viene trasformata in appartamenti.

La chiesa, soprannominata a Lucca la "chiesa delle sigaraie", per le operaie che andavano lì a pregare prima di iniziare il lavoro nella vicina Manifattura Tabacchi, è rimasta chiusa per circa

quarant'anni, fino al 2013. La copertura si trovava in pessimo stato di conservazione e in precario equilibrio statico: gli elementi dell'orditura primaria e secondaria erano in fase avanzata di degrado e in parte risultavano già compromessi strutturalmente.

Il manto di copertura risultava sconnesso e non garantiva più la protezione dalle acque meteoriche alla struttura lignea di copertura.

L'interessamento del FAI (Fondo Ambiente Italiano) con l'iniziativa "I Luoghi del Cuore", ha portato un rinnovato interesse per la chiesa ed il Ministero BBCC ha attivato il processo di conservazione del monumento, stanziando un fondo per le opere, iniziate a metà del 2013.

L'affresco della *Gloria di Santa Caterina*, sull'incanniccio collegato all'orditura di copertura, aveva già subito un distacco e risultava in più parti fessurato. Il canniccio era marcescente a causa delle infiltrazioni di acqua.



Figura 7. Affresco della *Gloria di Santa Caterina*, di Lorenzo Castellotti, fissato su supporto incanniccio alla struttura lignea di copertura, prima degli interventi di restauro

2. INTERVENTI DI RESTAURO

Il criterio ispiratore del progetto di restauro, anche per le particolari caratteristiche architettoniche, artistiche e strutturali, è stata la difesa dell'autenticità materiale dell'organismo architettonico, con ricadute anche sull'organizzazione e sull'operatività del cantiere, prevedendo i soli interventi che fossero realmente necessari secondo il criterio del "minimo intervento", e che fossero compatibili, durevoli e possibilmente reversibili.

Per focalizzare soluzioni ben calibrate e appropriate si è partiti da un iniziale percorso investigativo così da approfondire le conoscenze materiali e costruttive della chiesa.

La fase di conoscenza diretta, affrontata tramite il rilievo e la restituzione delle caratteristiche geometriche e costitutive del manufatto, ha garantito una lettura sistematica dell'organismo architettonico, nel suo complesso divenire fino allo stato di fatto; tale lettura è stata corroborata dall'analisi storica così da ritrovare nell'evoluzione della fabbrica la risposta ad alcune particolarità costruttive, come ad esempio la copertura non conclusa, la presenza di elementi costruttivi in luoghi particolari ed inaspettati, le colorazioni e i materiali lontani dalle tradizioni locali.

Già nella fase della diagnosi e dalle conoscenze ci si è avvalsi dell'apporto di diverse professionalità, e ciò ha garantito una sintesi critica delle conoscenze acquisite, così che le scelte progettuali operate sono state la espressione del bilancio conoscitivo finale.

Indispensabile è stata l'analisi diagnostica sullo stato di conservazione degli elementi lignei, condotta da *LegnoDOC srl*, non solo per conservare l'identità e l'unicità della consistenza materiale e delle particolarità costruttive, ma soprattutto per l'esigenza di non smontare il complesso di elementi di copertura in quanto solidale con la struttura lignea del controsoffitto, formata da travi, centine, regoli e canniccio (stuoia di canne) a volta ribassata, intonacata ed affrescata, corrispondente ad una parte residua del controsoffitto originariamente esteso quanto il locale di sottotetto. L'indagine diagnostica sulle orditure lignee ha avuto lo scopo di accertare dunque le caratteristiche tecnologiche e lo stato di conservazione delle strutture, come supporto al progetto di

consolidamento. L'ispezione, condotta secondo i criteri e le procedure stabiliti nella norma UNI 11119 "*Beni culturali. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera*", ha compreso l'identificazione della specie legnosa, il rilievo geometrico, la classificazione secondo la qualità resistente, l'identificazione delle zone critiche, valutazione dello stato di conservazione mediante ispezione visiva e analisi resistografica, stima della sezione resistente residua e valutazione della efficienza delle unioni.

Organizzate intorno alla caratteristiche della chiesa e alla natura dei suoi specifici problemi conservativi si sono effettuate poi ulteriori indagini sui materiali con l'obiettivo di acquisire diversi dati: analisi microstratigrafica per la caratterizzazione degli intonaci, analisi al microscopio ottico polarizzatore, analisi mineralogiche in diffrattometria di polveri ai raggi X, analisi petrografiche per l'analisi dei materiali lapidei. Sono seguite prove di applicazione di malte adesive epossidiche e rinforzi con sistemi compositi da applicare alla struttura lignea e al cannicciato dell'affresco per verificare compatibilità e individuare i migliori criteri operativi.

Il trattamento delle superfici è stato affrontato come un "problema di restauro", nella consapevolezza che la superficie resta il "luogo del degrado" ma è contestualmente luogo privilegiato di testimonianza storica ed estetica e che il colore dei prospetti riveste un ruolo figurativo nel complesso dell'edificio e nel contesto urbano. L'intervento sul colore ha dunque implicato considerazioni di carattere storico-critico: si è conservato l'intonaco consunto, che tuttavia non presentava distacchi dal substrato, limitandosi a risarcire le mancanze con un intonaco compatibile con l'esistente e, identificato il colore originale desunto dall'analisi stratigrafica precedentemente condotta, si è stesa una velatura tendente a restituire il "tono" originale.

La particolare conformazione architettonica della chiesa, metteva a disposizione un comodo accesso ai locali del sottotetto tramite una scala a chiocciola in pietra. Questo, fin da subito, ha offerto lo spunto progettuale per un intervento complessivo di valorizzazione che assicurasse le migliori condizioni di fruizione pubblica dell'intero organismo architettonico con l'idea che il visitatore, dopo essere stato avvolto dalla spettacolare illusione delle architetture dipinte, potesse "svelare l'inganno", salendo nei locali del sottotetto ed arrivando ad osservare l'affresco della Gloria di Santa Caterina ad una vicinanza che emoziona, a godere del piacere di indagare da vicino le affascinanti tecniche costruttive della struttura di copertura, conservate fin nei dettagli delle originarie ferraglie, guardare la cupola in muratura con le sue nervature e poter leggere con chiarezza i nuovi interventi di consolidamento che, sinceramente dichiarati, affiancano le strutture storiche con le quali si rapportano, creando un nuovo equilibrio figurativo.

Una scelta ulteriore è stata quella di inserire nel campanile una piccola scala a chiocciola metallica per offrire la possibilità di completare la visita scendendo di un livello, dal sottotetto alla quota di imposta della cupola.

Tale intervento di valorizzazione, oltre ad incrementare la fruizione, è diretto a migliorare le condizioni di conoscenza del bene architettonico e la conoscenza delle tecniche costruttive storiche, così da avere funzioni educative, di memoria e di sensibilizzazione.

Anche la progettazione del sistema di illuminazione e dell'impianto elettrico è stata appropriata e sensibile, a garanzia di modalità di intervento improntate sulla contemperazione della conservazione dei valori storico, artistici e materici della fabbrica e la valorizzazione dei valori estetico figurativi, valorizzando l'organismo architettonico e avvicinandolo alle esigenze di una appagante fruizione.

L'intero percorso progettuale e di cantierizzazione è stato inserito in un sistema in rete, *SICAR, Sistema Informativo per la documentazione georeferenziata in rete di Cantieri di Restauro*.

A conclusione del progetto, l'uso del SICAR consentirà di integrare le attività di valorizzazione del monumento con la diffusione pubblica dei risultati delle analisi tecniche, degli interventi di salvaguardia e della storia del monumento in un formato innovativo e di semplice interpretazione. L'uso del sistema informativo permette di attivare una politica di conservazione programmata al fine di garantire le attività di manutenzione ed evitare in futuro interventi straordinari di restauro e consolidamento.

3. INTERVENTI STRUTTURALI

Con l'obiettivo di coniugare le istanze della conservazione e le esigenze della sicurezza strutturale, il progetto di consolidamento e di miglioramento sismico è stato improntato su modalità di intervento poco invasive, basato sulla scelta di non modificare le strutture originarie ma di aggiungere nuovi elementi da affiancare all'esistente, così da ottenere una redistribuzione di compiti tra nuovo ed antico.

L'intero progetto ha perseguito l'obiettivo di coniugare tradizione e innovazione, e ha garantito la trasmissione al futuro di quanto pervenuto nella sua autenticità materica e formale. Tutto ciò nel rispetto dei principi della conservazione, tra cui la verifica della compatibilità fisico-chimica e meccanica, la reversibilità, la distinguibilità, l'autenticità, senza trascurare il controllo estetico dell'intervento.

Va sottolineato anche il delicato passaggio tra la progettazione, che è stata dettagliata ma pur sempre lontana dalla realtà materiale effettiva, e la realizzazione operativa, superato grazie alla costruttiva collaborazione instaurata tra le varie figure del cantiere. Gli operatori dell'impresa aggiudicataria della gara di appalto (*D66 srl - Roma*) hanno dimostrato passione, professionalità e competenza, e la direzione lavori a carico della Soprintendenza, strettamente coordinata con il progettista delle strutture, ha garantito il buon esito dell'intervento, ricercando le migliori soluzioni operative a favore della conservazione dell'identità e dell'autenticità materiale.

Sulla base delle indagini diagnostiche e dei sopralluoghi effettuati è emersa la necessità di effettuare interventi di consolidamento capaci di agire a due livelli: a *scala locale*, andando a risolvere i singoli problemi di dissesto, e a *scala globale*, cercando di conferire all'edificio il "comportamento scatolare" perduto, indispensabile per la sua sopravvivenza soprattutto in occasione di eventi sismici.

3.1. Il solaio di sottotetto

Tra i principali aspetti emersi dalla analisi diagnostica del legno vi è il forte degrado presente sulle travi di orditura principale del solaio di sottotetto a quota 13,20 m. Alcuni elementi presentavano un avanzato stato di degrado, tale da non essere più adeguati a garantire i carichi di progetto.

Si è optato per un intervento di consolidamento volto alla maggiore conservazione possibile sia degli elementi strutturali, sia della pavimentazione esistente in marmette di cotto. Le travi lignee sono state integrate con nuovi elementi, in legno lamellare di sezione 12x16mm, operando locali sostituzioni solo laddove lo stato di conservazione lo rendeva necessario.

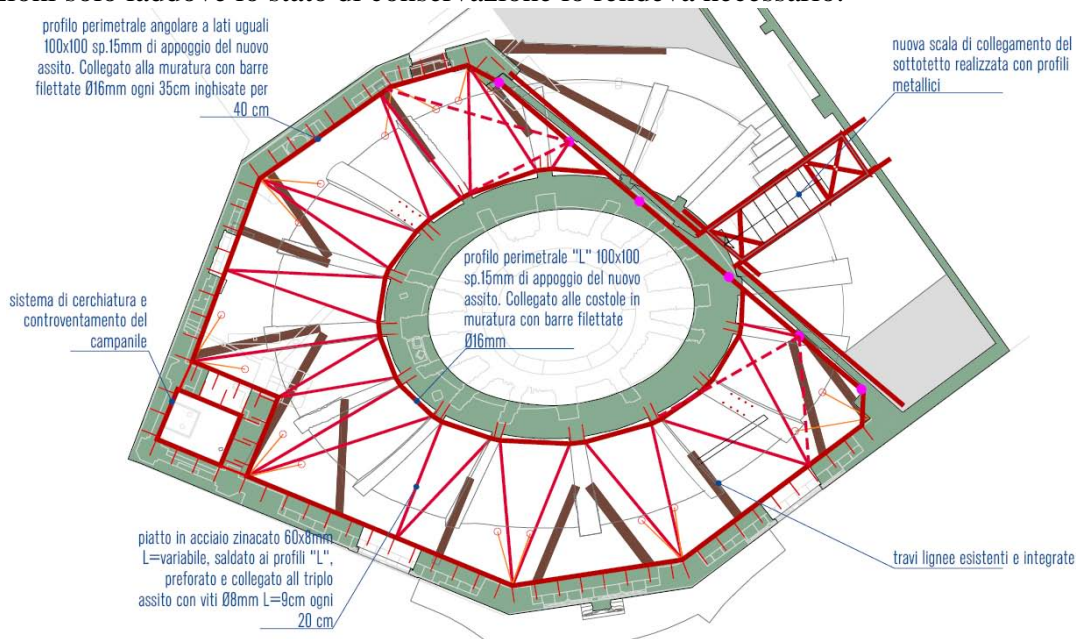


Figura 8. Orditura del solaio di sottotetto. Travi lignee principali, profili "L" perimetrali, bandelle in acciaio a raggiera.



Figura 9. Solaio di sottotetto. Integrazione delle travi lignee, prima della posa dell'assito triplo

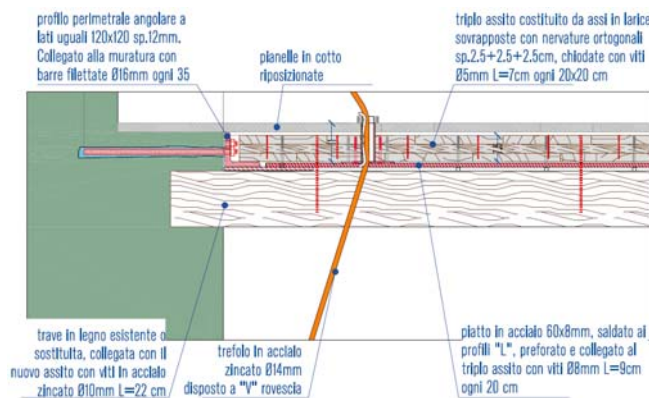


Figura 10. Schema di progetto del solaio di sottotetto

L'orditura di travi costituisce l'appoggio di un nuovo *triplo assito* incrociato, posato ad assi sovrapposte ortogonali, mutuamente chiodate. A completare il nuovo solaio vi sono profili metallici a "L", perimetrali, e bandelle disposte a "raggiera", collegate alle strutture lignee sovrastanti. L'intero *pacchetto* di solaio diviene quindi un diaframma rigido concepito come una *struttura reticolare orizzontale* con funzione di controvento di piano.

Al termine dei lavori è stato riposizionato il pavimento originario in marmette di cotto.

Per rendere visitabile questo spazio vi era la necessità di rifare la scaletta di accesso al sottotetto. Questo nuovo elemento di collegamento pedonale è stato studiato anche per collegare il nuovo solaio diaframma ai maschi murari (posizionati ad una quota più bassa). La scala, realizzata con cosciali in acciaio a sezione tubolare rettangolare, ha la funzione di vincolare il solaio-diaframma, opponendosi agli spostamenti dell'orizzontamento in caso di sisma.

3.2. Interventi in copertura

L'orditura del tetto è costituita da due capriate lignee a doppio monaco, caratterizzate da sensibili deformazioni e accentuato degrado, su cui poggiano i falsi puntoni che definiscono l'inclinazione delle falde. Su questi sono impostati travicelli che, a loro volta, portano pannelle in cotto.

L'intervento si è concentrato sulle due capriate lignee, già oggetto nel corso degli anni di interventi piuttosto grossolani, e sul pacchetto globale di copertura, cercando di rendere solidali i vari elementi. Il tetto così consolidato diviene un diaframma rigido di piano e consente all'edificio globale, inteso come struttura scatolare, di risultare "chiuso" in sommità da un coperchio rigido.

All'estradosso delle pannelle è stata prevista una sottile "cappetta" di malta (15mm) rinforzata con rete in fibra di vetro, collegata alla sottostante orditura lignea con *fiocchi* unidirezionali, in fibra di carbonio. Anche in questo caso l'ispirazione è riconducibile alle classiche strutture reticolari, dove i fiocchi creano il collegamento tra le fibre compresse (malta con FRP) e le fibre tese (costituite dalle travi lignee). I fiocchi in fibra lavorano egregiamente a trazione mentre la compressione viene assorbita da nuovi blocchi in legno, introdotti nello spazio tra i puntoni esistenti e il manto di copertura. Al di sopra della *cappetta* fibrorinforzata è stata stesa una membrana impermeabile e traspirante, per garantire la tenuta all'acqua, e infine sono stati riposizionati i coppi, fissati con un sistema di ganci ferma coppo.

Il nuovo tetto-diaframma è stato oggetto di un ulteriore intervento, con lo scopo di impedire rotazioni delle pareti perimetrali sotto l'azione sismica. È stato previsto un sistema di tiranti, ancorati all'imposta del tetto e inclinati verso il basso, così da contrastare possibili spostamenti orizzontali del tetto. I tiranti, a "V" rovescia, sono costituiti da due trefoli in acciaio Ø16mm che partono da un unico punto alto, in corrispondenza dell'imposta del tetto (quota +15,90m), scendono inclinati, oltrepassano il solaio-diaframma di sottotetto (quota +13,20m), e tornano ad unirsi in un unico punto, più in basso (quota +11,40m), in corrispondenza dell'imposta della cupola.

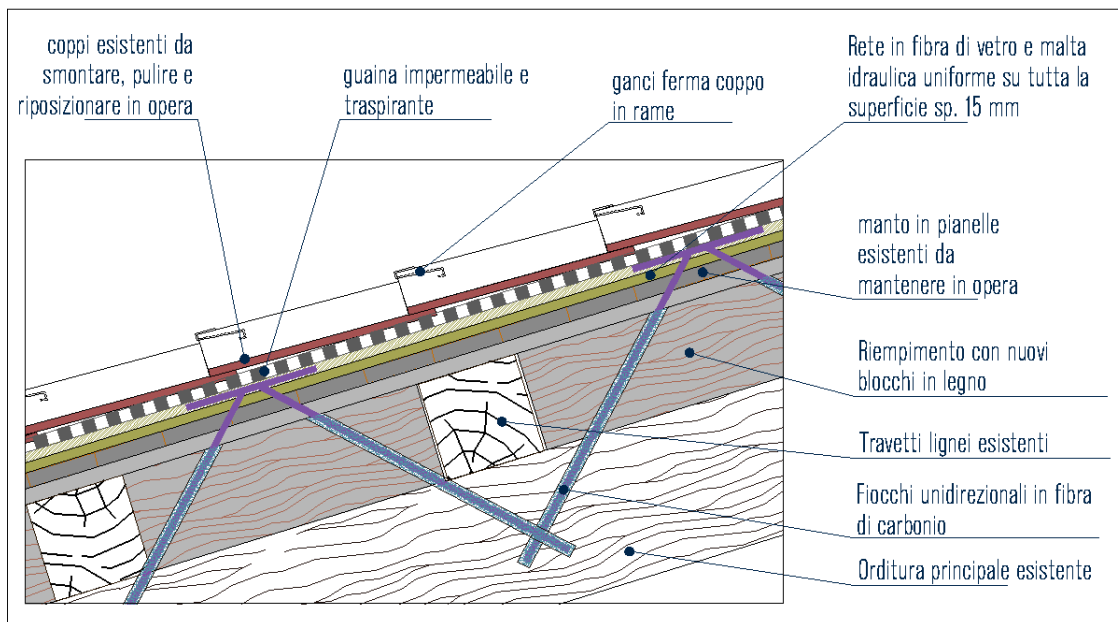


Figura 11. Schema di progetto dell'intervento di consolidamento del tetto.



Figura 12. Tiranti a "V" rovescia posizionati sopra il solaio di sottotetto, ancorati all'imposta del tetto



Figura 13. Tiranti a "V" posizionati sotto il solaio di sottotetto, ancorati all'imposta della cupola

Le due capriate lignee esistenti presentano geometrie differenti.

(A)_ La prima capriata, situata al centro della copertura, mostrava un'evidente inflessione della catena, causata dai carichi puntuali trasferiti dai due monaci. Al momento del progetto erano presenti alcuni semplici puntelli lignei che si opponevano a questa inflessione, appoggiati al degradato solaio di sottotetto. L'idea di utilizzare puntelli non è certo sbagliata, ma la posizione di quelli in essere (al centro dell'ambiente), costituiva un ostacolo alla percorribilità dello spazio. La soluzione di consolidamento progettato si ispira al medesimo principio dei puntelli lignei, ponendoli però in posizione più congrua con l'uso.

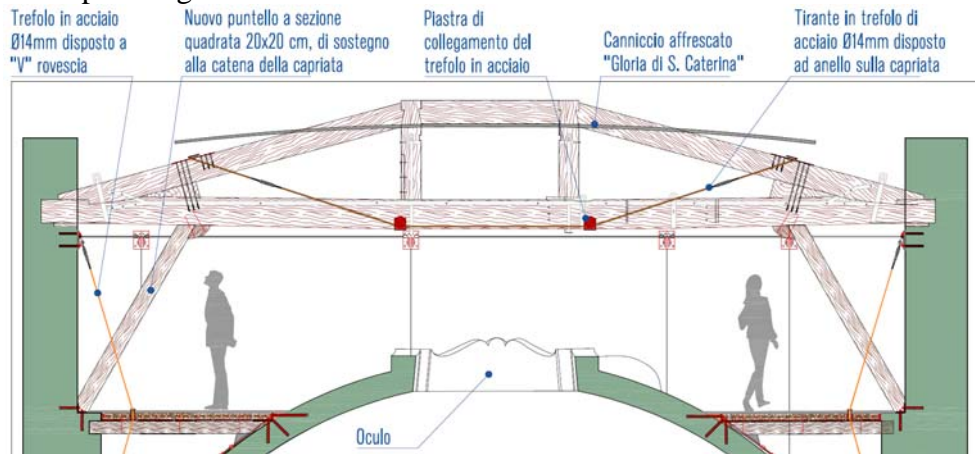


Figura 14. Intervento di rinforzo della prima capriata (A). Puntelli lignei e tralci in acciaio sagomati

Sono stati introdotti due nuovi appoggi, costituiti da puntelli lignei, di sezione 20x20 cm, inclinati verso le pareti perimetrali. L'inclinazione permette di ingombrare in misura ridotta lo spazio visitabile di sottotetto. È stato poi previsto un sistema di "armatura" della capriata, realizzato con tralci di acciaio sagomati, al fine di creare ulteriori due punti di appoggio della catena, in corrispondenza dei monaci.



Figura 15. Particolare degli interventi di rinforzo della prima capriata (A) con puntelli lignei e tralci in acciaio sagomati.



Figura 16. Particolare degli interventi di rinforzo della prima capriata (A) con tralci in acciaio sagomati

(B)_ La seconda capriata, periferica rispetto alla prima, presenta un tamponamento in muratura interposto tra gli elementi lignei e tra il pavimento e la catena, e soffre localmente fenomeni di degrado causati dalle infiltrazioni di acqua dal tetto. Anche in questo caso erano presenti puntelli lignei a contrastare l'inflessione della catena. Visto che non costituivano ostacolo alla percorribilità dell'ambiente, si è deciso di mantenerli in essere, insieme alla struttura lignea principale.

La soluzione di rinforzo ha previsto l'affiancamento alla capriata lignea di una nuova struttura metallica, facendo così collaborare nuovo ed antico. La nuova struttura si compone di due porzioni

mutuamente collegate: una interna all'ambiente di sottotetto e lasciata a vista, e l'altra esterna, celata da un sottile strato di intonaco.

La porzione interna è inserita nello spazio tra la catena della capriata a quota +16,10m e il solaio di sottotetto a quota +13,40m, e si sviluppa come una *trave Vierendeel*, in cui la distribuzione dei montanti si ispira ai puntelli esistenti parzialmente inglobati nella muratura. .

La parte esterna, invece, si sviluppa su tutta la superficie occupata dalla capriata, dal colmo fino al solaio di sottotetto. Questa porzione, accostata alla capriata, ne ripropone gli assi principali e viene integrata con diagonali di controvento. Le due strutture, quella interna e quella esterna, sono collegate tra loro e alla capriata lignea interposta, mediante perni, creando una nuova trave reticolare mista legno-acciaio.

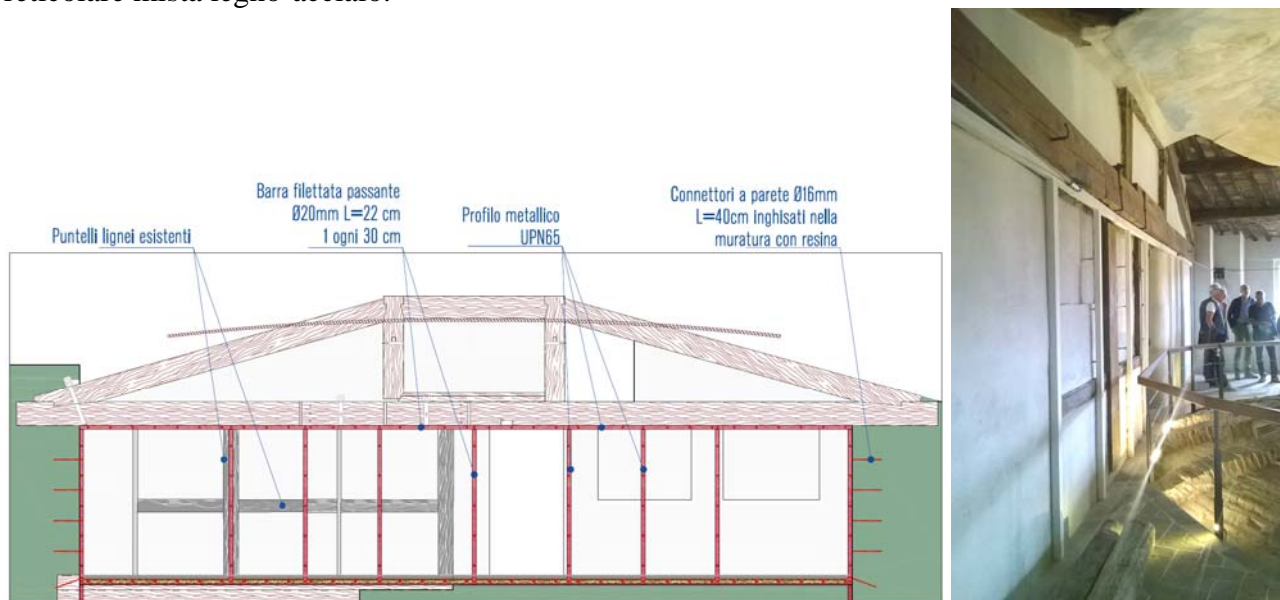


Figura 17. Intervento di rinforzo della seconda capriata (B). Travi reticolari, interna ed esterna, collegate alla capriata

3.3. Cerchiatura delle murature perimetrali

Il progetto introduce due anelli di cerchiatura lungo il perimetro interno delle murature, realizzati con trefoli di acciaio Ø16mm, uno a quota dell'imposta estradossale della cupola ellittica (quota +11,40m) e l'altro all'imposta delle falde del tetto (quota +15,90m). Le cerchiature intendono opporsi alle spinte verso l'esterno esercitate dalla cupola e dal tetto inclinato.

Tutti i trefoli sono a vista, così da essere facilmente manutenibili (in particolare è possibile controllarne il tesaggio) ma non risultano di forte impatto visivo, integrandosi con gli altri interventi di consolidamento.

3.4. Rinforzo della cupola ellittica

Un particolare ed innovativo sistema di cerchiatura è stato progettato per il consolidamento della cupola ellittica, oggetto di un approfondito calcolo agli elementi finiti rivolto allo studio del comportamento sotto l'azione sismica. Sono state simulate sia le condizioni allo stato di fatto sia molteplici soluzioni di consolidamento possibili, che hanno indirizzato alla scelta di quella più adatta.

Una analisi iniziale è stata condotta su un modello parziale, che prende in esame **la sola cupola**, come se questa fosse un elemento singolo, vincolato a terra. Questa semplificazione permette di confrontare i soli contributi di ciascun sistema di consolidamento, depurati dalle interferenze dovute alla geometria globale dell'edificio.

Il carico applicato è pari alle 8 diverse combinazioni sismiche previste dalla normativa.

Il primo sistema di consolidamento introdotto nel modello, per far fronte alle sollecitazioni sismiche, prevede l'uso di anelli di cerchiatura lungo i "paralleli", disposti su tre livelli, tesati a

10kN. Questo sistema è diffuso da secoli nel rinforzo di cupole grazie ai noti benefici in termini di riduzione degli sforzi di trazione, favorendo il comportamento a sola compressione.

Un secondo sistema inserito nella modellazione prevede l'utilizzo di cavi radiali estradossali in corrispondenza delle costole di nervatura, lungo i “meridiani”, tesati a 10 kN. Questo sistema, una interessante declinazione dell' “arco armato” proposto da JURINA (1999), produce una azione di confinamento della cupola, limitando altresì gli spostamenti in caso di azione sismica. Il consolidamento viene realizzato con la posa di trefoli in acciaio adiacenti alla superficie voltata ed ancorati efficacemente alla muratura di imposta (quota +11,40m) e al solaio di sottotetto (quota +13,20m), prima di essere sottoposti a trazione mediante tenditori. Applicare una trazione ai cavi comporta una contemporanea e duale compressione cerchiante sulla cupola, che migliora il suo comportamento statico.

Il terzo modello studiato combina i due sistemi appena descritti, ovvero la cerchiatura ad anelli paralleli e l'uso di cavi radiali lungo le costole.

In Tabella 1 sono riportati i principali esiti di questo primo studio: si possono apprezzare le forti riduzioni delle aree soggette a trazione, così come la riduzione delle sollecitazioni massime.

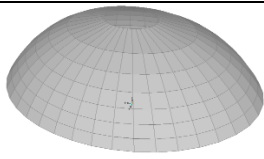
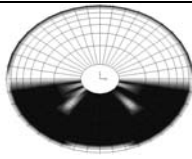
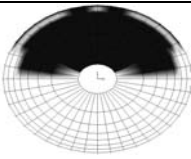
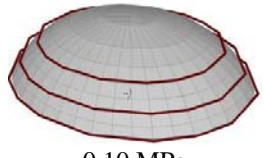
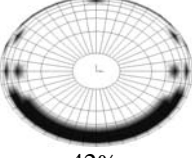
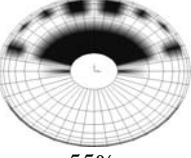
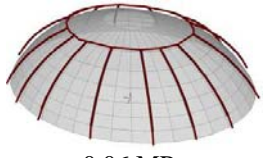
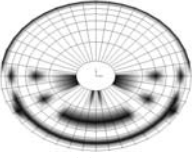
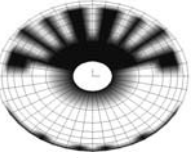
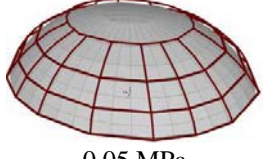
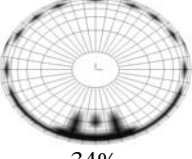
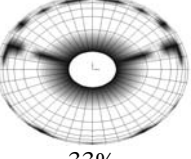
	Sforzo massimo a trazione	Area a trazione INTRADOSSO	Area a trazione ESTRADOSSO	Δ lungo x \perp sisma	Δ lungo y // sisma
Stato di fatto	 0,18 MPa	 66%	 75%	100 %	100 %
Cavi lungo i paralleli	 0,10 MPa	 42%	 55%	90 %	92 %
Cavi meridiani	 0,06 MPa	 38%	 42%	86 %	75 %
Cavi lungo i paralleli + Cavi meridiani	 0,05 MPa	 34%	 33%	76 %	66 %

Tabella 1. Confronto tra tensioni allo stato di fatto e utilizzando 3 sistemi di consolidamento, sotto azione sismica Modellazione della sola cupola soggetta a sisma

In seconda fase si è condotta l'analisi della risposta sismica della cupola considerando **l'intera geometria dell'edificio**, introducendo i sistemi di consolidamento già illustrati nel modello semplificato.

La situazione più gravosa, allo stato di fatto, vale a dire non consolidata, si ottiene all'intradosso della cupola, dove le zone soggette a trazione presentano una superficie molto estesa (il 69% della superficie intradossale della cupola e il 56% dell'estradosso sono soggetti a trazione). All'intradosso i valori di sforzo raggiungono i picchi più elevati (0,48 MPa).

L'analisi del primo sistema di rinforzo, costituito da anelli di cerchiatura lungo i “paralleli”, mostra una considerevole riduzione delle aree soggette a trazione (si passa dal 69% al 35% della superficie intradossale della cupola soggetta a trazione), e contemporaneamente si ottiene una riduzione anche dello sforzo massimo rilevato (da 0,48 Mpa a 0,33 MPa).

I risultati ottenuti con il secondo sistema, cavi radiali estradossali in corrispondenza delle costole di nervatura, fanno registrare una modesta riduzione in termini di superficie soggetta a trazione. Si passa dal 69 % al 59% della superficie intradossale della cupola soggetta a trazione. Si ottiene invece una notevole riduzione degli sforzi massimi di trazione (si passa da 0,48 MPa a 0,24 MPa). Utilizzando ancora il modello globale sono stati poi combinati i due sistemi (anelli di cerchiatura lungo i “paralleli” e cavi radiali estradossali sulle costole). I risultati ottenuti sono particolarmente interessanti.

La superficie intradossale soggetta a fenomeni di trazione passa dal 69% al 25%, e i picchi di sforzo si riducono anch’essi notevolmente (si passa da 0,48 MPa a 0,21 MPa).

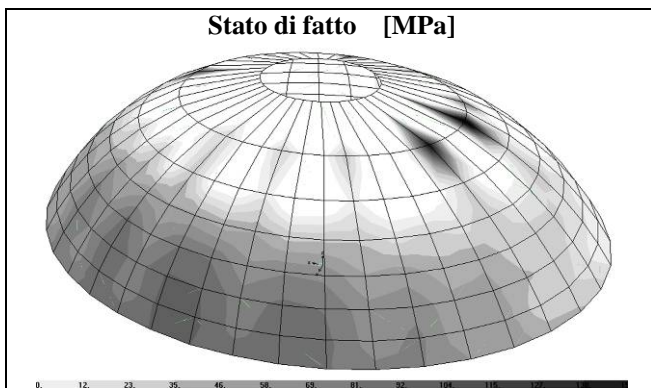


Figura 18. Tensioni massime (in N/mm²) all’intradosso della cupola per sisma (+Y + 0,3X).¹

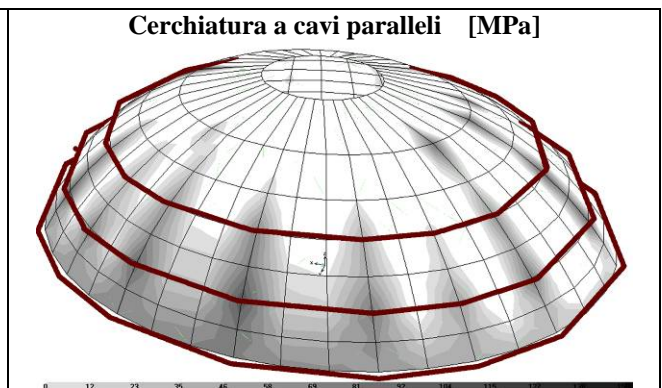


Figura 19. Tensioni massime (in N/mm²) all’intradosso della cupola per sisma (+Y + 0,3X).¹

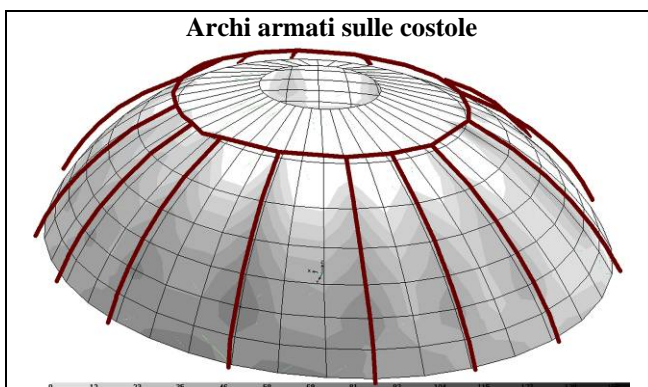


Figura 20. Tensioni massime (in N/mm²) all’intradosso della cupola per sisma (+Y + 0,3X).¹

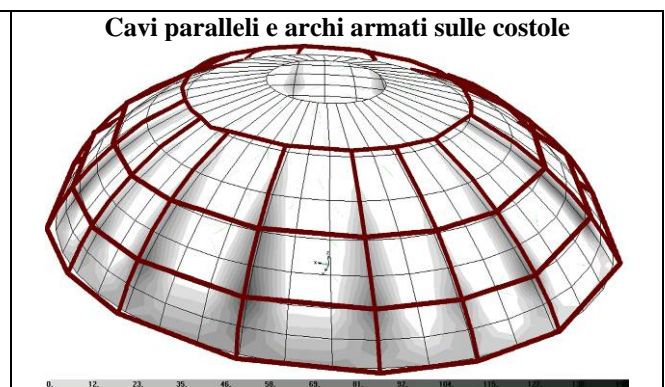


Figura 21. Tensioni massime (in N/mm²) all’intradosso della cupola per sisma (+Y + 0,3X).¹

	Sforzo massimo a trazione	Area a trazione INTRADOSSO	Area a trazione ESTRADOSSO	Δ lungo x ⊥ sisma	Δ lungo y // sisma
Stato di fatto	0,48 MPa	69%	56%	100 %	100 %
Cavi lungo i paralleli	0,33 MPa	35%	32 %	90 %	95 %
Cavi meridiani	0,24 MPa	59%	48 %	85 %	70 %
Cavi lungo i paralleli + Cavi meridiani	0,21 MPa	25%	34 %	75 %	65 %

Tabella 2. Confronto tra tensioni allo stato di fatto e utilizzando 3 sistemi di consolidamento, sotto azione sismica. Modellazione dell’intera geometria dell’edificio, soggetto a sisma

¹ Nelle Figure 16, 17, 18, 19 sono rappresentate in bianco le zone soggette a compressione e in scala di grigio le trazioni

I risultati di entrambe le sperimentazioni numeriche (sia utilizzando il modello semplificato di Tabella 1 che il modello completo di Tabella 2), mettono in evidenza che, accanto alle tradizionali cerchiature lungo i paralleli, i cavi lungo i meridiani (ossia gli *archi armati*) svolgono un ruolo importante soprattutto in termini di riduzione degli spostamenti generati dall'azione sismica, tale da ridurli del 65%.

Alle modellazioni di tipo numerico è stata affiancata una semplice dimostrazione sperimentale dell'efficacia degli interventi di cerchiatura estradossale. La volta e gli interventi di consolidamento sono stati riprodotti su una cupola in gelatina, materiale particolarmente adatto a far risaltare deformazioni e spostamenti. In tabella 3 si riportano i principali comportamenti osservati.

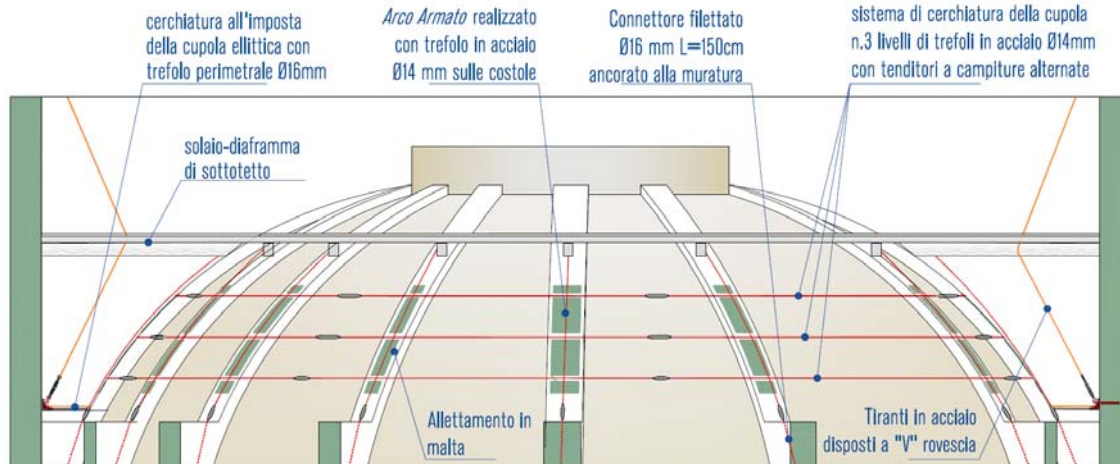


Figura 22. Intervento di rinforzo della cupola ellittica con trefoli di cerchiatura paralleli e trefoli meridiani sulle costole.

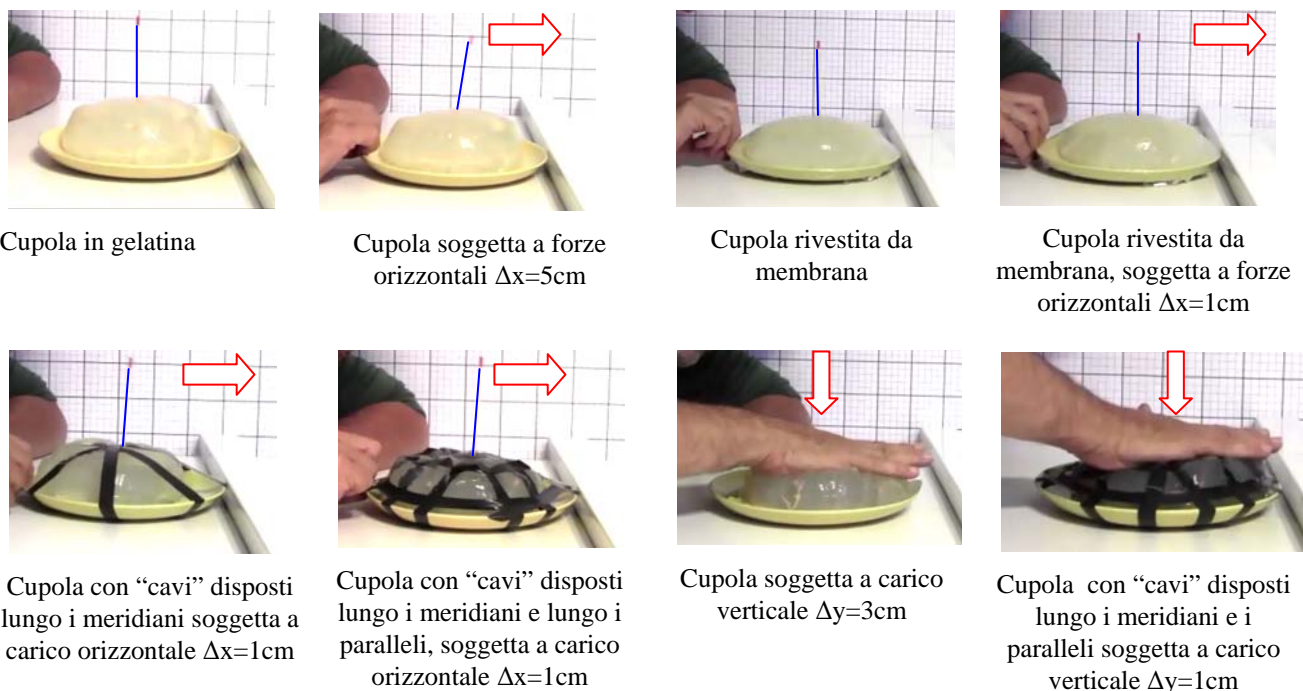


Tabella 3. Sperimentazione su cupola in gelatina soggetta a carichi verticali (y) e orizzontali (x).

Il modello enfatizza gli spostamenti Δx e Δy di una cupola soggetta a carichi orizzontali e verticali, e simula l'azione di interventi di rinforzo estradossali. La presenza di una membrana o di cavi disposti all'estradosso della cupola e ancorati alle imposte limita fortemente gli spostamenti della stessa e modifica le frequenze e le ampiezze di vibrazione.

3.5. Rinforzo della torre campanaria

Anche il campanile in muratura, degradato in superficie, è stato oggetto di intervento di rinforzo.

Il sistema adottato comprende profili perimetrali, interni alla torre, con funzione di cerchiatura, e controventi.

I profili perimetrali, realizzati con sezioni a “L” 120x120x12, sono stati posizionati in corrispondenza degli orizzontamenti esistenti e diffusamente ancorati alle murature. Il controventamento è stato realizzato con profilati angolari a lati uguali, di dimensioni 45x45x5mm, disposti a “V” rovescia. La disposizione dei controventi è legata alla presenza di varchi perimetrali da lasciare liberi, per consentire il passaggio ai visitatori, oppure alla presenza di finestre.

All'interno della torre campanaria è stata introdotta una scala metallica a chiocciola, per collegare il solaio di sottotetto (quota +13,20m) al camminamento situato all'imposta della cupola (quota +11,40m). Anche in questo caso le necessità distributive sono state conciliate con le esigenze strutturali, inserendo un elemento funzionale, che fosse in grado da fungere anche da consolidamento globale del campanile stesso.

Il montante centrale, realizzato con un profilo tubolare metallico, è il perno intorno a cui si sviluppano i gradini, ciascuno realizzato con una tavola in legno che distribuisce il peso a due tubi portanti, ancorati al montante centrale ed intestati nella muratura. La raggiera di profili metallici, sviluppata intorno al montante, forma un sistema di cerchiatura in direzione radiale, che coincide con lo sviluppo della scala.



Figura 23. Intervento di rinforzo della cupola ellittica con trefoli di cerchiatura paralleli e trefoli meridiani sulle costole



Figura 24. Scala interna al campanile, in fase di realizzazione

4. CONCLUSIONI

La collaborazione tra architetti ed ingegneri, applicata ad un bene prezioso ed inconsueto come la chiesa di Santa Caterina in Lucca, ha consentito la definizione di soluzioni economiche, funzionali ed innovative, orientate ad incrementare la sicurezza del monumento, favorendone una fruizione rispettosa. Gli interventi di restauro e quelli di consolidamento statico sono stati condotti con discrezione e sono stati volutamente dichiarati in quanto affiancano, a tutto diritto, le originarie strutture del monumento. Nuovi percorsi che conducono ai luoghi più segreti e più “intatti” della chiesa, sono stati recentemente aperti ai visitatori per consentire loro di osservare da vicino la *grande macchina* che sorregge la cupola ellittica ed i suoi preziosi affreschi.



Figura 25. Vista interna al sottotetto: in primo piano l'oculo riaperto, in secondo piano gli interventi di consolidamento.



Figura 26. La facciata della Chiesa di Santa Caterina a Lucca a restauri conclusi.

5. DATI DEL CANTIERE

Progetto di restauro della Chiesa di Santa Caterina in Lucca

- Soprintendenza BAPSAE Province di Lucca e Massa: soprintendente *arch. Giuseppe Stolfi*
- Responsabile del procedimento: *arch. Agostino Bureca*
- Progettista e direttore dei lavori: *arch. Lisa Lambusier*
- Progetto strutturale e miglioramento sismico: *prof. ing. Lorenzo Jurina*
- Direttore operativo lavori: *arch. Laura Panzani*
- Coordinatore della sicurezza in fase di progetto e di esecuzione: *arch. Giuseppe Monticelli*
- Stazione appaltante: *Direzione Regionale Beni Paesaggistici ed Architettonici della Toscana*
- Imprese esecutrici: *D66 srl - ARA restauri*

BIBLIOGRAFIA

- Jurina L., Stolfi G., Lambusier L., Mogenicato V.E. (2014), *“L'intervento di restauro e consolidamento strutturale alla chiesa di Santa Caterina in Lucca”*, Safe Monuments, Firenze, 2014.
- Jurina L. (2013), *“Cerchiatura di strutture murarie: tecniche tradizionali e innovative”*, Ingenio n. 16.
- Jurina L. (2012), *“Strutture in elevazione”* in *Almanacco dell'Architetto (da un'idea di Renzo Piano)*, Proctor Edizioni, Bologna,.
- Jurina L. (2012), *“Tecniche di consolidamento dei monumenti: una panoramica attuale”*, IF-CRASC '12, V Convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Pisa.
- Farneti F., Lenzi D., [a cura di] (2006), *“Realtà e illusione nell'architettura dipinta, quadra turismo e grande decorazione nella pittura di età barocca”*, Alinea, Firenze.
- Torraca G., (2001) *La cura dei materiali nel restauro dei monumenti*, Monsignori, Roma.
- Jurina L., (1999) *Una tecnica di consolidamento attivo per archi e volte in muratura*, International Symposium on Seismic Performance of Built Heritage in Small Historic Centers, Assisi, Italia.
- P. Fancelli, (1998) *Il restauro dei monumenti*, Cardini, Firenze.
- C. Brandi, (1997) *Teoria del restauro*, Einaudi.
- Archivio di Stato di Lucca, ASL, Perizie Lucca, sezione C3 detta del Terziere S. Donato.